VARIAÇÕES TEMPORAIS DE NÍVEIS DE ÁGUA NA BACIA DO RIO MADEIRA ESTIMADAS POR SATÉLITE ALTIMÉTRICO ENVISAT

Frank Menezes de Freitas [1]; Joecila Santos da Silva[2] ; Stéphane Calmant[3], Frédérique Seyler[4]

Resumo – A água é essencial para vida, contudo seu monitoramento está limitado a redes hidrológicas que registram as variações da superfície da lâmina de água em pontos fixos ao longo dos rios. Os avanços da altmetria espacial particularmente durante os últimos 10 anos demonstram que esta técnica permite medida de água em hidrossistemas continentais. Para este estudo foram executas 25 estações virtuais no Rio Madeira com os 8 anos de dados da missão ENVISAT. A validação mostra bons resultados com rms de 36 cm, oferecendo a possibilidade de monitoramento desta região como parte de um programa de monitoramento hidrológico em longo prazo. O regime hidrológico é caracterizado por uma onda de cheia multimodal, de ascensão lenta e recessão rápida, como a estiagem ocorrendo, preferencialmente, durante os meses de setembro a novembro e a cheia estendendo-se durante os meses de fevereiro a junho. Os coeficientes de variação das cotas altimétricas denotam valores mais altos a jusante, decrescendo progressivamente à montante. Esses resultados demonstram que a missão altimetrica ENVISAT permite o monitoramento hidrológico deste rio transfronteiriço.

Abstract Surface fresh water is essential for life, yet surface freshwater measurements are limited mostly to in situ networks of gauges that record water surface elevations at fixed points along river channels. Advances in satellite radar altimetry, particularly over the past 10 years and even more recently, have demonstrated that this hydraulic variable can be measured reliably over inland waters. An evaluation of the ENVISAT data set has been presented for the 8 years of this mission of the Madeira River, with an initial study group of 25 virtual stations. Validation shows the results can be accurate to 36 cm rms, offering the potential to observe this region as part of a long-term hydrological monitoring program. The hydrological regime is characterized by a multimodal flood wave, slow rise and fast recession. Drought has occurred during the months of March to April, and the flood has occurred during January to May. The coefficients of variation of the water stage

[1] 1 Universidade do Estado do Amazonas – UEA ; Bacharelado em Meteorologia; Escola Superior de Tecnologia – EST; Av.Darcy Vargas, 1200, 69065-020, Manaus - AM, Brasil e-mail; Frank.meteoro@gmail.com; fmf.mtr@uea.edu.br
2 Universidade do Estado do Amazonas – UEA; Centro de Estudos Superiores do Trópico Úmido – CESTU; Avenida Djalma Batista 3578, Flores, 69050-010, Manaus-AM, Brasil; e-mail: joecila.silva@ird.fr
3 Institut de Recherche pour le Développement – IRD ; UMR 5566 LEGOS CNES/CNRS/IRD/UT3; 14 av. Edouard Belin, 31400, Toulouse, France ; e-mail: stephane.calmant@ird.fr
4 Institut de Recherche pour le Développement – IRD ; UMR ESPACE-DEV ; 500 rue Jean François Breton, 34093, Montpellier Cedex 5, France ; e-mail: frederique.seyler@ird.fr.

denote higher values downstream while the values much lower upstream reaches. These results demonstrate that the altimetry ENVISAT data to measure and monitor the transient flood waves of this trans-boundary river can be realized.

Palavras-Chave – Regime Hidrológico, Altimetria, Rio Madeira.

1. INTRODUÇÃO

A Bacia Amazônica é a maior bacia hidrográfica do planeta com uma área de drenagem de aproximadamente 6 milhões de km^2, caracterizada pela sua imensa superfície drenada, 37% da América do Sul, apresenta uma baixíssima declividade na sua planície aluvial, ou seja, terrenos baixos e planos junto aos cursos d'água, possuindo uma grande diversidade de afluentes. Os rios da região Amazônica apresentam leitos de largura extensa, tendo numerosos braços de escoamento da água. Os eixos fluviais da Bacia Amazônica são verdadeiras vias de comunicação humana e corredores de grande importância socioeconômica para a bacia, onde parte de suas atividades encontra-se, com freqüência, exposta às enchentes causadas pelo constante avanço e recuo das águas na região. Está localizada ao Norte da América do sul entre os paralelos 5º de latitude Norte (rio Cotigo, Brasil) e 20º de latitude Sul (rio Parapeti, Bolívia), e entre os meridianos de 48º (rio Pará, Brasil) e 79º (rio Chamaya, Peru) de longitude Oeste (Silva et al.2007). Os países que compartilham a Bacia Amazônica são: Brasil, Bolívia, Peru, Colômbia, Equador, Venezuela e Guiana.

A bacia Amazônica possui uma rede estações hidrológicas permitindo-se obter medidas dos níveis dos rios. Devido a sua grande extensão, a coleta de tais dados é insuficiente para se obter um estudo detalhado sobre a mesma, pois demandam um custo de instalação e manutenção altíssimo (Alsdorf, 2001a) bem como, a existência de problemas comuns na maioria das redes de monitoramento que inclui inadequado monitoramento, falhas nos dados, redução geral do número de estações, insuficiência crônica de financiamento, diferença de processamento e controle de qualidade e diferentes políticas de gestão de dados (WMO, 2003).

A utilização dos satélites altimétricos para o monitoramento em águas continentais auxilia na obtenção dos dados dos níveis de água e medidas de vazões em lugares de difícil acesso, uma vez que são caracterizados em alcançar tais lugares de forma homogênea, contínua e freqüente, possuindo um detalhamento espacial e temporal diferentes das redes de observações convencionais (Calmant e Seyler, 2006) que pode ser verificados na Figura 1 onde apresenta-se a cobertura espacial da missão ENVISAT na bacia Amazonica.

Neste estudo, busca-se aplicar a técnica de altimetria espacial a fim de caracterizar e analisar a variabilidade espacial e sazonal do regime hidrológico do rio Madeira com base em dados altimétricos de nível de água obtidos de estações virtuais utilizando o algoritmo *Ice-1* do satélite ENVISAT.

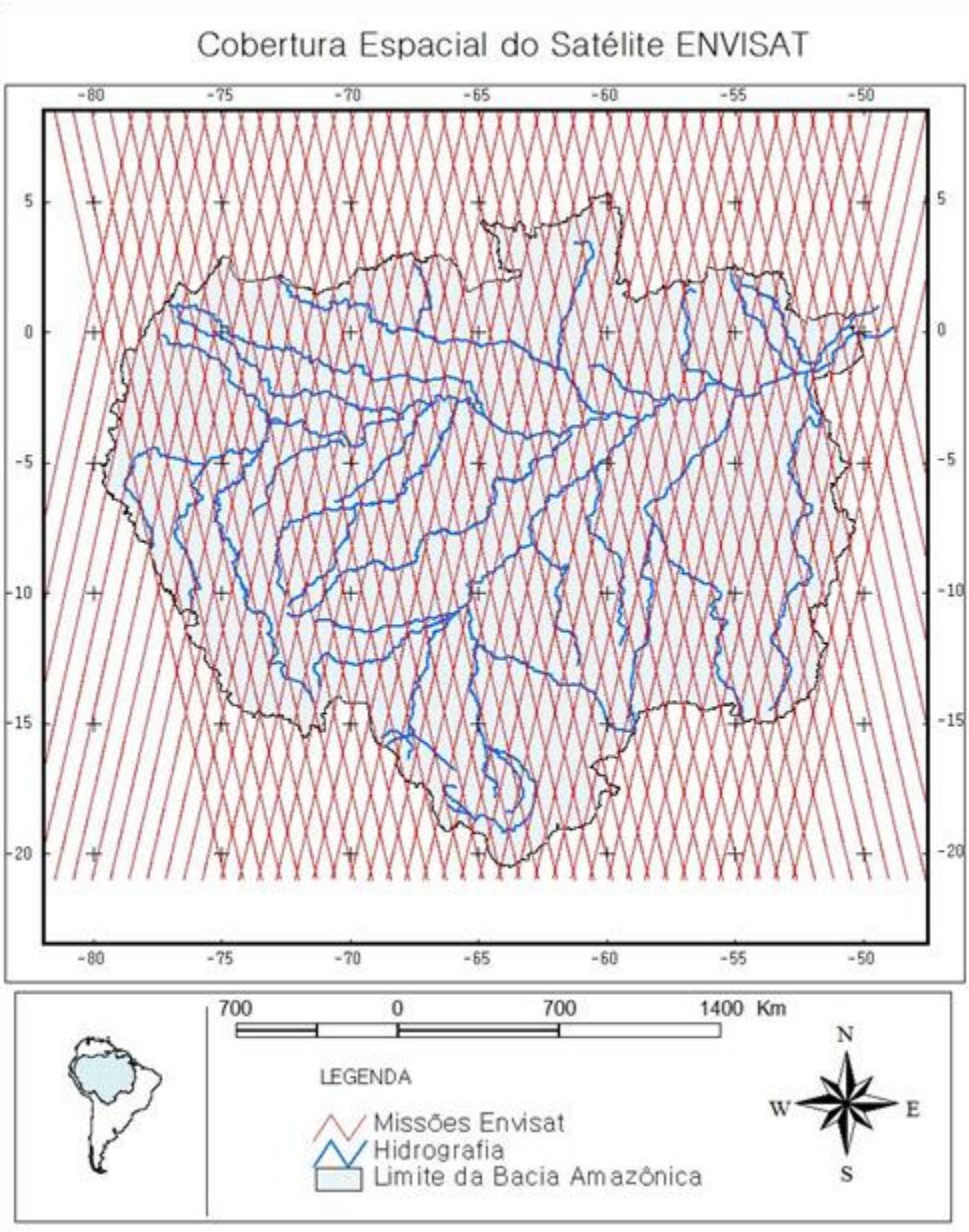


Figura 1 - Bacia Amazônica com a cobertura espacial da missão ENVISAT.

2. MATERIAIS E METÓDOS

2.1 Área de estudo

A área de estudo abrange todo o Rio Madeira, de sua nascente, no rio Beni, no rio Amazonas. O rio Madeira está inserido em uma extensa área de floresta pluvial, sendo considerado um dos principais afluentes meridionais do rio Amazonas e o segundo tributário andino da bacia. Em bacias onde é grande a variação anual do nível de água, torna-se freqüente o aparecimento de áreas sujeitas à inundação, conforme ocorre no trecho do rio Madeira.

O rio é rico em sedimentos que traz dos Andes. O rio Madeira possui as três unidades morfo-estruturais, com a seguinte proporção: Andes (15%), planície Amazônica (44%) e Escudo Brasileiro (41%). Devido a essa característica, verificam-se grandes altitudes na parte montante do rio, vastas zonas de inundação na planície e a presença de cachoeiras no Escudo brasileiro, principalmente próximo a Porto Velho. A bacia do rio Madeira é apresentada na Figura 2.

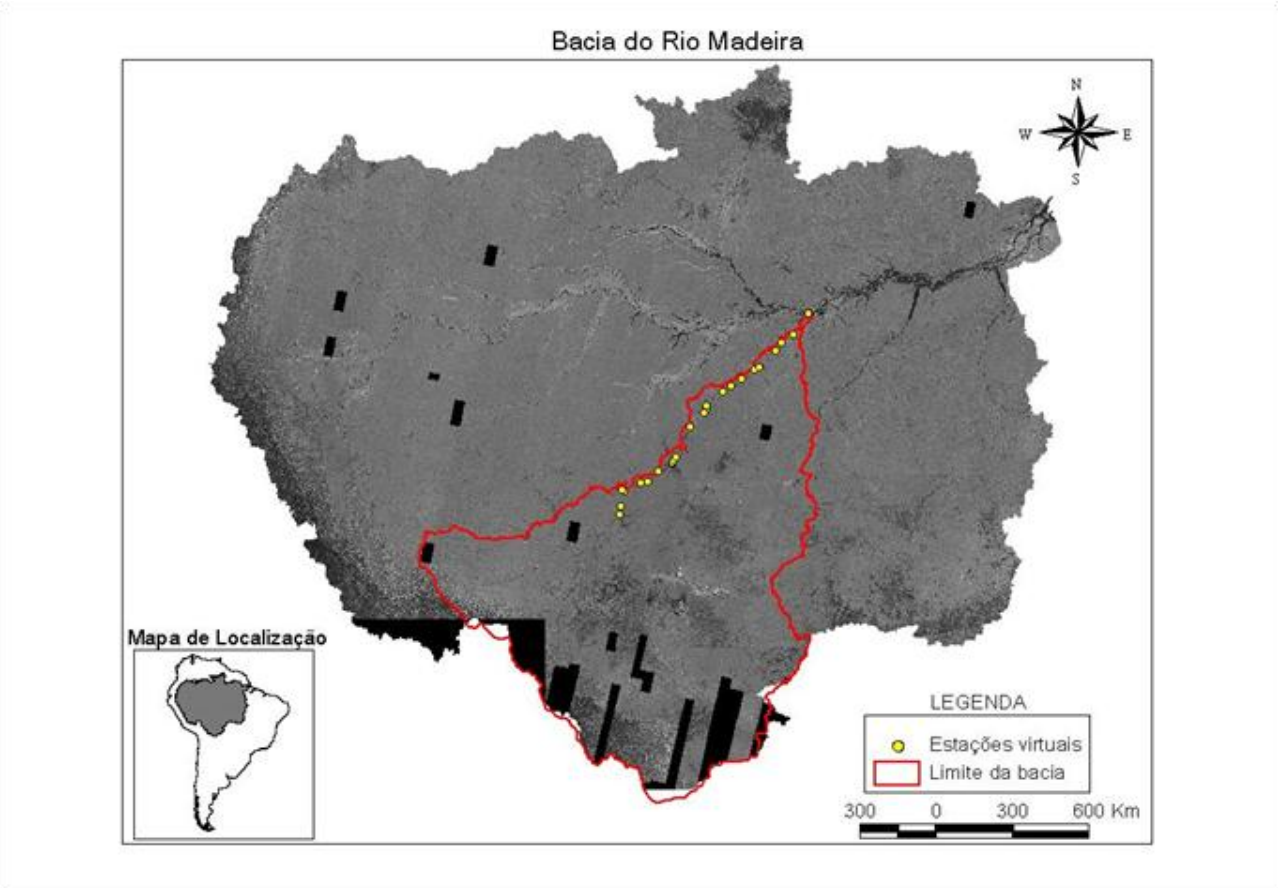


Figura 2 - Localização da bacia do rio Madeira, objeto deste estudo, e estações virtuais (pontos em amarelo). Mosaico de imagens JERS-1 no período de cheia em segundo plano.

2.2 Dados

2.2.1 Dados *in situ*

Para este estudo, a série temporal de nível de água da estação linimétrica Humaita (-7.508°; -63.020°) foi obtida da rede hidrometeorológica da Agência Nacional de Águas (ANA), disponível no site Hidroweb.

2.2.2 Dados Altimétricos

O Satélite ENVISAT (*ENVIronmental SATellite*) foi lançado em março de 2002, sendo o maior satélite para observação da Terra construído até agora. Pesa mais de oito tolenadas devido ao seu material, alem de constituir 10 instrumentos de grande porte para análises de atmosfera, continentes, oceanos e gelo na Terra. Os dados recolhidos pelo ENVISAT são utilizados para o estudo cientifico da Terra, análise ambiental e alterações climáticas.

Os registros de dados geofísicos (*Geophysical Data Records* – GDRs), processados e disponibilizados pelo *Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère* – CTOH do *Laboratoire d´Études en Geophysique et Océanographie Spatiales* – LEGOS, para uso no presente estudo proveniente da missão ENVISAT, utilizando-se o algoritmo standard de tratamento de FO *Ice-1,* foram obtidos entre as coordenadas geográficas 90°W a 40°W e 13°N a 21°S. Extraíram-se do CTOH 90 traços, totalizando 93 ciclos de 10/2002 a 10/2010. Foram desenvolvidos programas em linguagem Fortran para cada algoritmo *standard* de tratamento das FOs do satélite ENVISAT (*Ocean, Ice-1, Ice-2 e Sea-ice*) que permitem calcular a posição à 20Hz (*i.e.*, 1/20$^{\text{éssimo}}$ de segundo) da medida altimétrica com data, latitude, longitude e altura do plano de água a partir da equação da órbita do satélite com as devidas correções ambientais e geofísicas que permitem a criação das bases de dados para utilização no programa *Virtual ALtimetry Station* – VALS (VALS, 2011).

2.3 Elaboração das Estações Virtuais

Cada interseção de um traço altimétrico com o plano de água consiste numa estação virtual, sendo potencialmente possível obter uma série temporal da altura do plano de água. Foram usados os programas VALS (*Virtual Altimertry Station*) (VALS Tool, 2011) juntamente com o *Google Earth*, (*Google Earth, 2011*) permitindo uma seleção tri-dimensional dos dados em um espaço superfície-profundidade descrita em Silva *et al*. (2010). Para cada interseção extrai-se o traço altimétrico dos pontos correspondentes ao plano de água, para tal o mosaico de imagens do programa *Google Earth* é utilizado em segundo plano. Uma vez os pontos selecionados, os dados altimétricos permitem construir uma série temporal de nível de água calculando-se a média e mediana do conjunto de medidas, bem como, associando-se uma dispersão caracterizando a qualidade dos resultados obtidos. As alturas são convertidas em altitude utilizando-se o modelo de ondulação geoidal por EGM2008 desenvolvido Pavlis *et al*. (2008).

Nome da Estação	Latitude	Longitude	Mínima	Máxima	Amplitude (m)
MADEIRA_478_02	-3,331	-58,784	9,1	18,06	8,96
MADEIRA_063_01	-3,338	-58,774	9,52	18,51	8,99
MADEIRA _607	-4,052	-59,335	10,46	20,34	9,88

MADEIRA _020	-4,342	-59,725	11,68	22,27	10,59
MADEIRA _149	-4,647	-59,922	13	23,54	10,54
MADEIRA _693	-5,211	-60,516	14,25	27,24	12,99
MADEIRA _564	-5,302	-60,656	16,77	28,35	11,58
MADEIRA _235	-5,619	-61,145	19,41	30,81	11,4
MADEIRA _106	-5,856	-61,497	20,91	32,96	12,05
MADEIRA _779	-6,084	-61,761	22,03	35,44	13,41
MADEIRA_650_01	-6,552	-62,37	27,25	39,79	12,54
MADEIRA _321	-6,697	-62,343	28,33	40,29	11,96
MADEIRA_650_02	-6,793	-62,423	28,13	41,16	13,03
MADEIRA _865	-7,278	-62,933	33,41	45,4	11,99
MADEIRA _407	-8,349	-63,413	41,11	52,39	11,28
MADEIRA_192_01	-8,46	-63,513	41,44	53,2	11,76
MADEIRA_192_02	-8,568	-63,537	42,93	54,29	11,36
MADEIRA_192_03	-8,605	-63,545	43,3	54,6	11,3
MADEIRA _951	-8,845	-64,021	47,87	60,29	12,42
MADEIRA _736	-9,192	-64,395	60,49	70,35	9,86
MADEIRA _493	-9,259	-64,647	62,19	72,48	10,29
MADEIRA_278_01	-9,548	-65,193	78,02	89,45	11,43
MADEIRA _035	-9,518	-65,307	77,34	89,89	12,55
MADEIRA_278_02	-10,088	-65,314	83,78	94,68	10,9
MADEIRA_278_03	-10,344	-65,372	97,66	103,93	6,27

Tabela 1 – Identificação das Estações Virtuais

2.4 Elaboração das séries temporais altimétricas

As séries temporais altimétricas foram obtidas utilizando-se as medianas das medidas altimétricas e associando-se uma dispersão à mediana, de forma a caracterizar a qualidade e confiabilidade dos resultados obtidos. Tal dispersão foi calculada pelo desvio absoluto da mediana Eq. (1):

$$DAM = \frac{1}{n-1} \sum_{n-1}^{n} |H_i - H_{med}| \qquad (1)$$

sendo n o número de medidas selecionadas, H_i a iéssima medida altimétrica selecionada, e $H_{méd}$ a mediana das medidas selecionadas.

Adicionalmente, as alturas elipsoidais da superfície da água das séries temporais altimétricas foram convertidas em alturas geóidais (*i.e*, cota altimétrica), empregando-se o modelo de ondulação geoidal EGM2008 desenvolvido por Pavlis *et al.* (2008).

2.5 Validação dos dados altimétricos

Considerando-se que nenhuma mudança hidrológica seja evidenciada entre o traço do satélite e a posição da estação linimétrica, a qualidade das séries temporais altiméticas foi analisada através da comparação direta por regressão linear das cotas altimétricas com as medidas da estação linimétrica computando-se o valor eficaz ou RMS (*Root Mean Square*), definido pela Eq. (2):

$$\mathbf{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(H_{1,i} - H_{2,i}\right)^2}{n}} \qquad (2)$$

sendo n o numero de medidas, $H_{1,i}$ as medidas altimétricas e $H_{2,i}$ as medidas da régua linimétrica.

2.6 Caracterização do regime hidrológico

Os rios são cursos de água que transportam escoamentos concentrados com superfície livre alimentados pelas águas advindas de precipitações pluviais ou da contribuição subterrânea (Silva *et al*., 2003) apresentam a forma mais visível de escoamento superficial da bacia hidrográfica fazendo parte integrante do ciclo hidrológico (Chistofoletti, 1981). A vazão é a principal grandeza que caracteriza um rio (Villela e Mattos, 1975) sendo variável no tempo e no espaço e tida como estocástica (Tucci, 2001). Essa variabilidade representada pela subida e descida das águas consideradas no decorrer de um ano civil (janeiro a dezembro) ou um ano hidrológico (ciclo de vazante-cheia-vazante) corresponde ao regime fluvial ou regime hidrológico do rio.

Para a caracterização do regime hidrológico destaca-se primeiramente a representação gráfica das informações hidrológicas por meio de séries temporais de altura da superfície da água, com o intuito de observar o comportamento das cotas ao longo do tempo de registros altimétricos (*i.e*, 2002 a 2010) verificando-se a existência de periodicidade e estacionariedade, assim como, a possível existência de anomalias.

No sentido de facilitar a identificação de períodos sazonais foram elaborados cotagramas calculando-se as médias mensais anuais das cotas altimétricas utilizando-se a metodologia proposta por Bittencourt e Amadio (2007). Foi considerado para delimitar o período de cheia, o valor médio menos o desvio padrão calculado para as cotas altimétricas máximas anuais. Igualmente, utilizando a média acrescida do desvio padrão das cotas altimétricas mínimas anuais, foi definido o valor limítrofe para o período de estiagem.

Segundo Chow (1964) a variabilidade do regime fluvial pode ser examinada e detalhada com maior precisão atribuindo-se parâmetros estatísticos à representação gráfica. Para este estudo calculou-se a amplitude média da superfície da água obtida através dos dados resultantes do

cotagrama e o coeficiente de variação como parâmetro de distribuição auxiliar na avaliação da variabilidade do regime hidrológico em questão.

A equação que define a amplitude média é dada por:

$$(A)^{-} = (H_{\downarrow}máx)^{-} - (H_{\downarrow}\min)^{-} \quad (3)$$

sendo $\overline{A}$ a amplitude média, $\overline{H}$ *máx* a cota máxima do cotagrama e $\overline{H}$ *mín* a cota mínima do cotagrama.

Para o cálculo do coeficiente de variação, primeiramente é necessário conhecer a média e o desvio padrão da série temporal. De acordo com Montgomery e Runger (2003) a medida do desvio padrão fornece informações complementares à informação contida na média avaliando a dispersão do conjunto de valores. Para o cálculo do desvio padrão aplicou-se a Eq. (4).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(H_i - \overline{H})}{n-1}} \quad (4)$$

sendo σ o desvio padrão, H a cota altimétrica, $\overline{H}$ a média das cotas altimétricas é *n* o numero de medidas.

O cálculo do coeficiente de variação por sua vez, foi expresso pelo inverso da medida média da série temporal altimétrica pelo seu desvio padrão, assim tem-se a Eq. (5).

$$C_v = \frac{\sigma}{\overline{H}} \quad (5)$$

sendo C_v o coeficiente de variação, σ o desvio padrão e $\overline{H}$ a média das cotas altimétricas.

Com vistas à representação espacial da amplitude, foi confeccionado um mapa utilizando-se o sistema de informações geográficas ARCVIEW (versão 3.3). Para tanto, estabeleceram-se intervalos de classe e, a estas, associadas cores que permitam uma visualização melhor dos resultados.

3. RESULTADOS E ANÁLISES

3.1 Estações Virtuais

Um conjunto de 25 estações virtuais (Tabela 1) fundamentado na análise dos dados altimétricos do rio Madeira provenientes do satélite ENVISAT teve seus dados analisados

separadamente para a geração das séries temporais altimétricas. A localização das estações virtuais pode ser observada na Figura 2.

De acordo com Roux *et al.* (2010) a metodologia para descrever a determinação de séries temporais de nível de água com dados altimétricos (*i.e.*, estação virtual) utilizadas nos estudos de hidrossistemas continentais, é uma seleção regular dos dados altimétricos cujo obedece a critério exclusivamente geográfico, isto é, um retângulo delimitado pelas latitudes e longitudes mínimas e máximas, sem qualquer critério para eliminação dos ruídos provenientes do tamanho da faixa imageada.

Uma metodologia manual descrita em Silva *et al.* (2010) e validada em Roux *et al.* (2010) e Seyler *et al.* (2008), permite uma seleção tri-dimensional dos dados em um espaço superfície-profundidade através do programa VALS (*Virtual ALtimetry Station*) utilizando o mosaico de imagens do Google Earth como segundo plano, apresentando diversos tratamentos da medida altimétrica, como a seleção individualizada de cada medida por ciclo e múltiplas correções do efeito de afastamento em relação ao nadir (*off-nadir*). A partir do emprego da ferramenta VALS, selecionam-se, com maior confiabilidade, os dados altimétricos sob qualquer plano de água para cada passagem do satélite.

Sob o traço 0020 do satélite ENVISAT, é mostrado, na Figura 3, um exemplo de estação virtual utilizando-se o algoritmo *ice-1*. Na Figura 3A, o satélite ENVISAT cruza o rio Madera no sentido norte-sul. O perfil hidrológico medido pelo altímetro durante o trajeto do ENVISAT é mostrado na Figura 3B, onde cada linha representa um ciclo de passagem do satélite, e os pontos indicam as médias da medida do altímetro. Observa-se que, com uma seleção somente geográfica, podem ser selecionados dados que não são de medidas de altura de água, mas medições nas margens do rio ou no solo. Por outro lado, com a ferramenta usada para este estudo, pode-se fazer uma seleção mais refinada dos dados altimétricos, abstraindo-se, para cada traço do satélite, medidas efetivamente de altura de água, tanto na cheia como na vazante. Na figura 3C está a série temporal onde se observam bons resultados com pequenas dispersões nas medidas.

Figura 3A. Trajetória do satélite ENVISAT no sentido norte-sul, traço 0020 que cruza o rio Madeira. Seleção dos dados altimétricos através do polígono, em amarelo. Seleção final dos dados altimétricos nos cíclos, em vermelho. Mosaico de imagens do *Google Earth* em segundo plano.

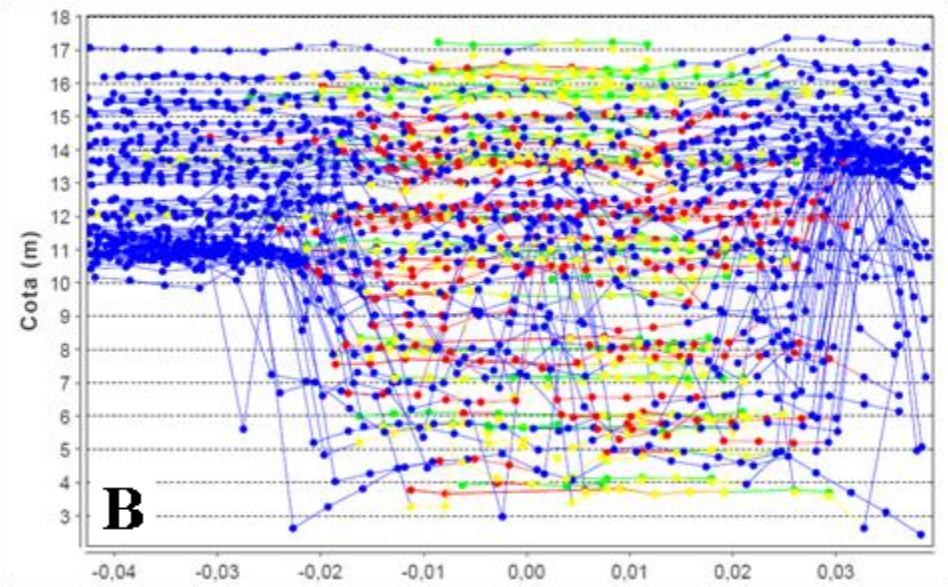


Figura 3B. Perfil hidrológico satélite ENVISAT. Seleção normal dos dados altimétricos está em vermelho; seleção para aplicação da correção do efeito *off-nadir* está configurada em amarelo, enquanto as medidas com as correções efetuadas aparecem em verde.

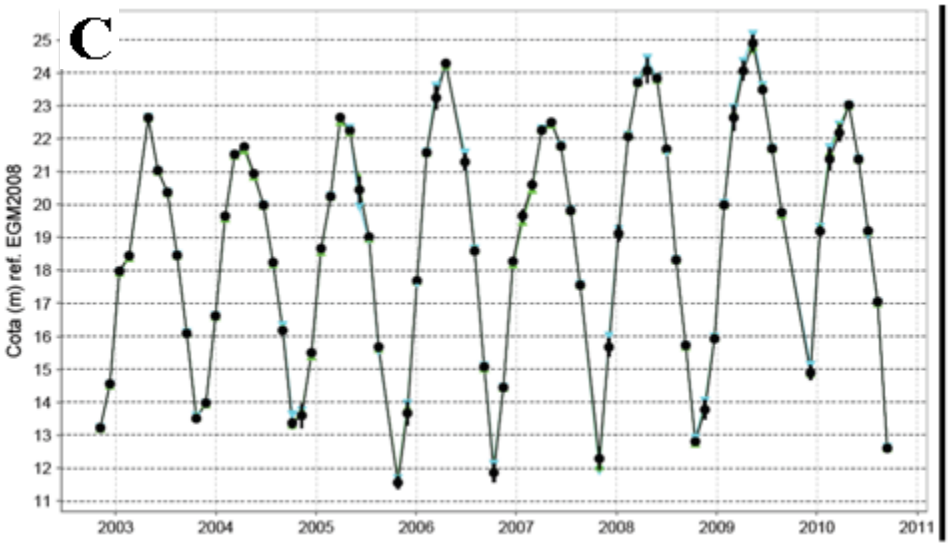


Figura 3C. Série temporal altimétrica da estação Madeira_0020.

3.2 Validação dos Dados Altimétricos

O estudo de validação das séries temporais de nível de água foi conduzido utilizando-se a estação virtual MADEIRA_865 e a estação linimétrica de Humaitá. O traço 865 do satélite ENVISAT está localizado 27,2 km a jusante da estação linimétrica onde a largura do rio Madeira é de aproximadamente 1,4 km. O RMS entre as diferenças de níveis de água é 36 cm, comparável com os valores encontrados nos estudos de validação em rios Amazônicos conduzidos por Silva *et al*. (2010) onde 70% das séries temporais elaboradas com dados do satélite ENVISAT apresentaram RMS inferior a 40 cm.

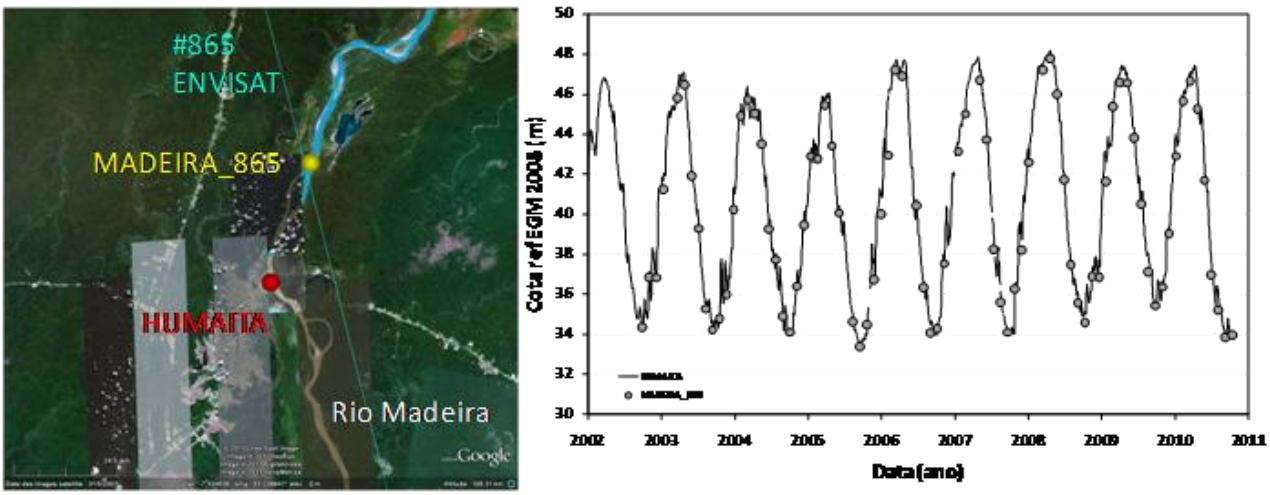
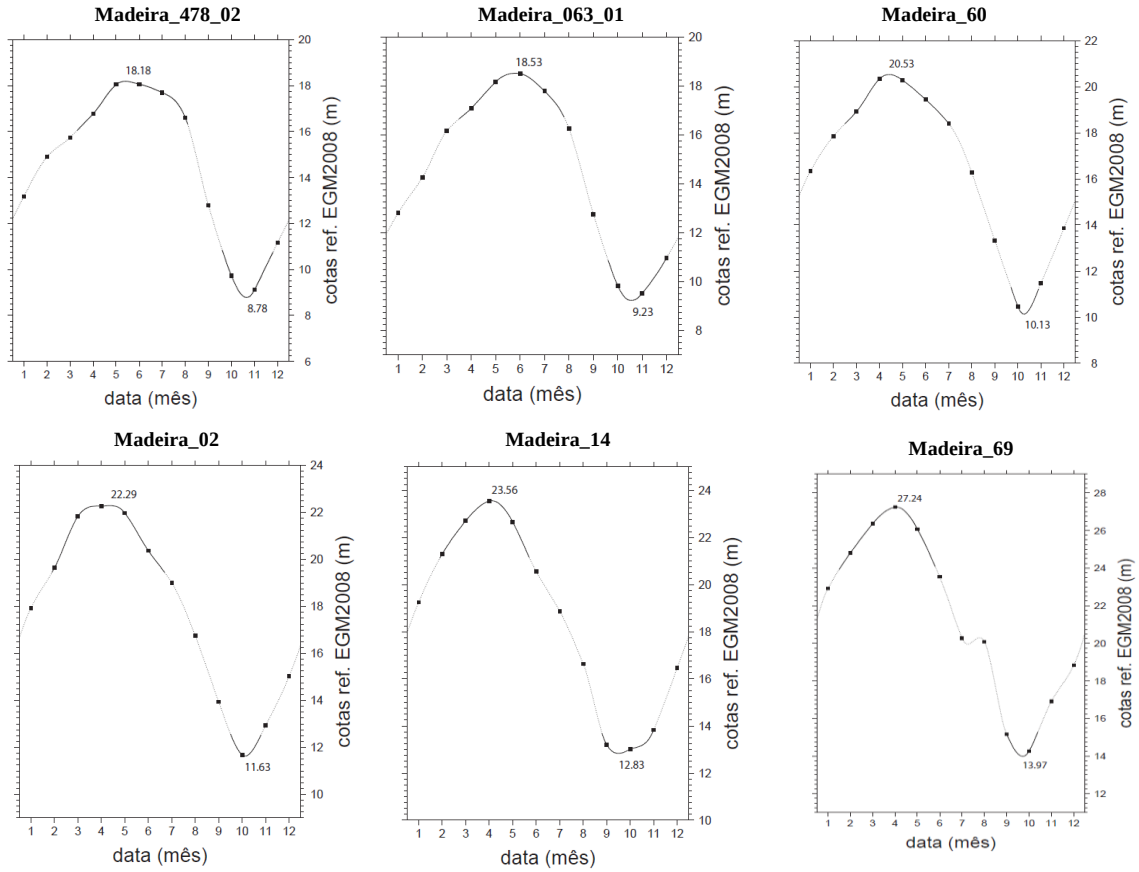


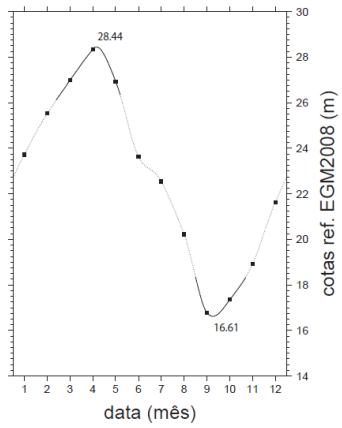
Figura 4. Validação dos dados altimétricos para o rio Madeira. Mosaico de imagens Google Earth, em segundo plano.

3.3 Caracterização do regime hidrológico do Rio Madeira

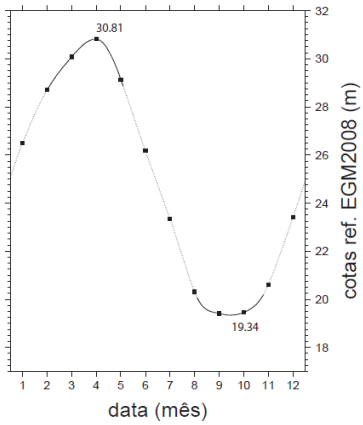
Inicialmente, foram gerados 25 cotagramas (Figura 5), um para cada estação virtual, a partir da análise estatística das médias mensais. Os gráficos foram gerados de maneira que se tornasse possível observar o comportamento do nível de água ao longo do ano, de modo a avaliar a sazonalidade durante os oito anos selecionados para estudo (2002 a 2010). A delimitação dos períodos sazonais é de grande importante para aplicações de metodologias referentes à coleta de informações que estão relacionadas às diferenças hidrodinâmicas e hidro-morfológicas estabelecidas nos períodos de cheia e estiagem.



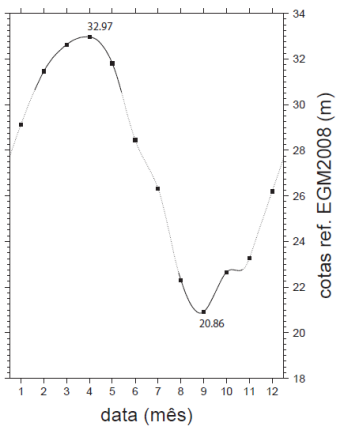
Madeira_56



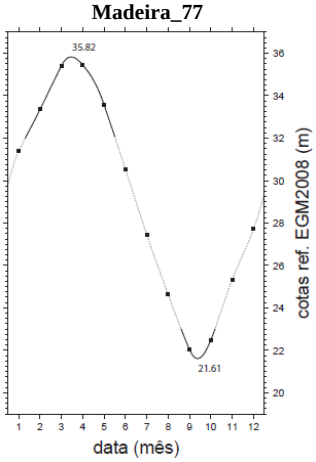
Madeira_23



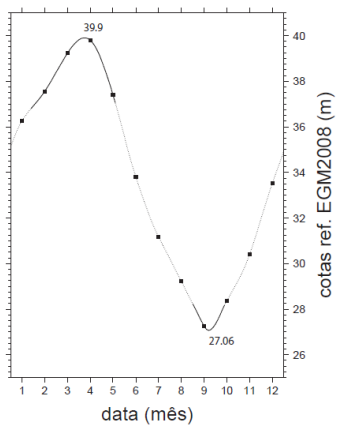
Madeira_10



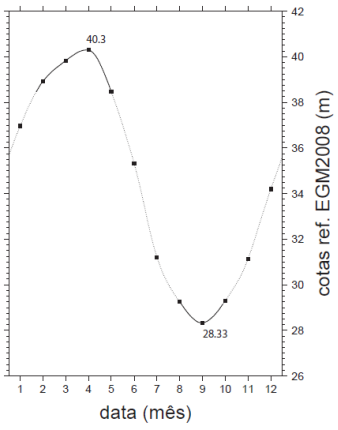
Madeira_77



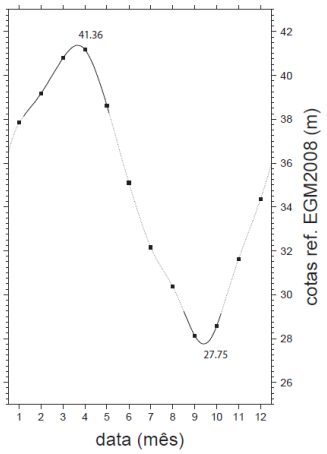
Madeira_650_01



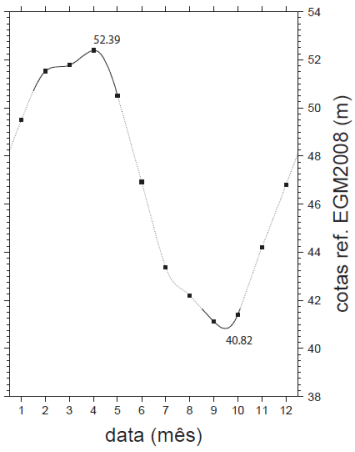
Madeira_32



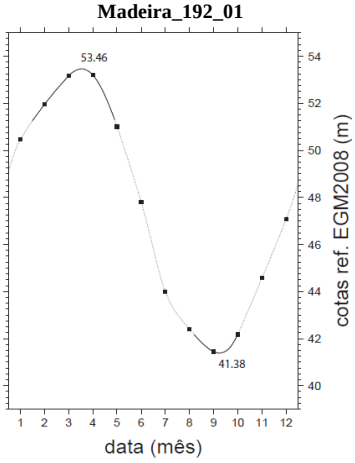
Madeira_650_02



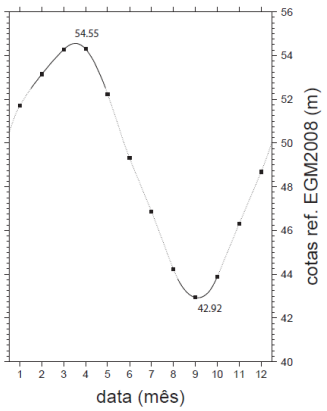
Madeira_407



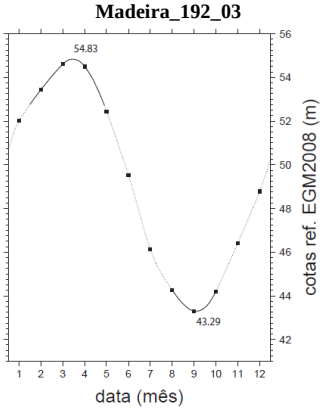
Madeira_192_01



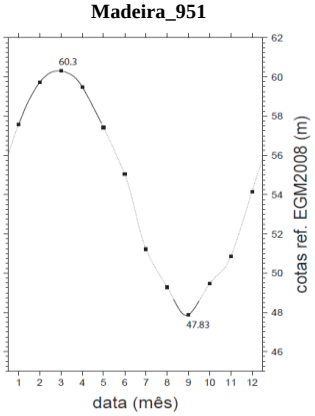
Madeira_192_02



Madeira_192_03



Madeira_951



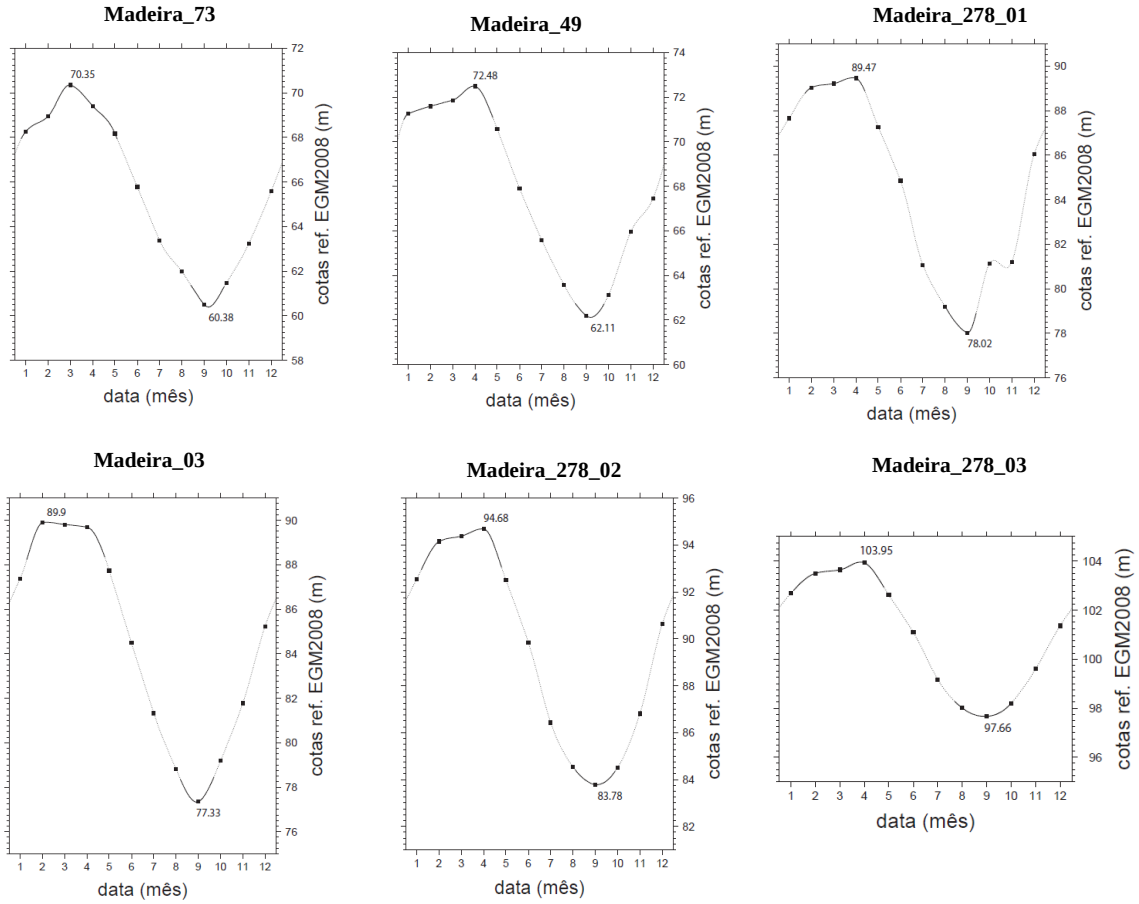


Figura 5 – Cotagrama das estações virtuais do rio Madeira referentes ao período estudado onde são identificados os períodos de cheia e estiagem com um traçado contínuo e as cotas máximas e mínimas.

A partir da análise dos cotagramas foi possível observar que o rio Madeira apresenta dois (2) períodos hidrológicos bem definidos ao longo do ano: um período de estiagem que se inicia em Setembro podendo se estender até Novembro, apresentando com mais frequência, as vazões mínimas nos meses de Setembro, e um período de cheia suavizado, que abrange de Fevereiro, onde as vazões máximas são encontradas mais frequentemente no mês de Abril. Particularmente, pode-se observar que a ascensão do cotagrama de cheia é mais acelerada, enquanto a recessão diminui progressivamente na vazante, frequentemente com um ou mais picos de cheia menos acentuado no segundo semestre característico de regime equatorial (Rodier, 1964 e Molinier, 1997). Adicionalmente, é possível identificar que 69,23% tiveram o valor máximo anual no mês de junho, 23,07% em maio e 7,69% em abril, enquanto que 53,84% tiveram o valor mínimo anual no mês de fevereiro, 23,07% em setembro e 7,69% nos meses de janeiro, março e dezembro.

A Figura 6 mostra o mapa com distribuição da amplitude média dos cotagramas das 25 estações virtuais para o período de estudo, sendo descritas na Tabela 1. O regime hidrológico do rio Madeira caracteriza-se por apresentar uma variabilidade significativa da lâmina de água (Tabela 1).

Evidencia-se, na Figura 6, o crescimento da amplitude média em direção à foz, onde a primeira estação virtual Madeira_478_02, tem amplitude média de 0,96 m, a menor dentre todas as estações, enquanto a última estação, NAPO_923_02, próximo à foz, tem amplitude média de 3,02 m, a maior dentre todas as estações situadas no rio Madeira.

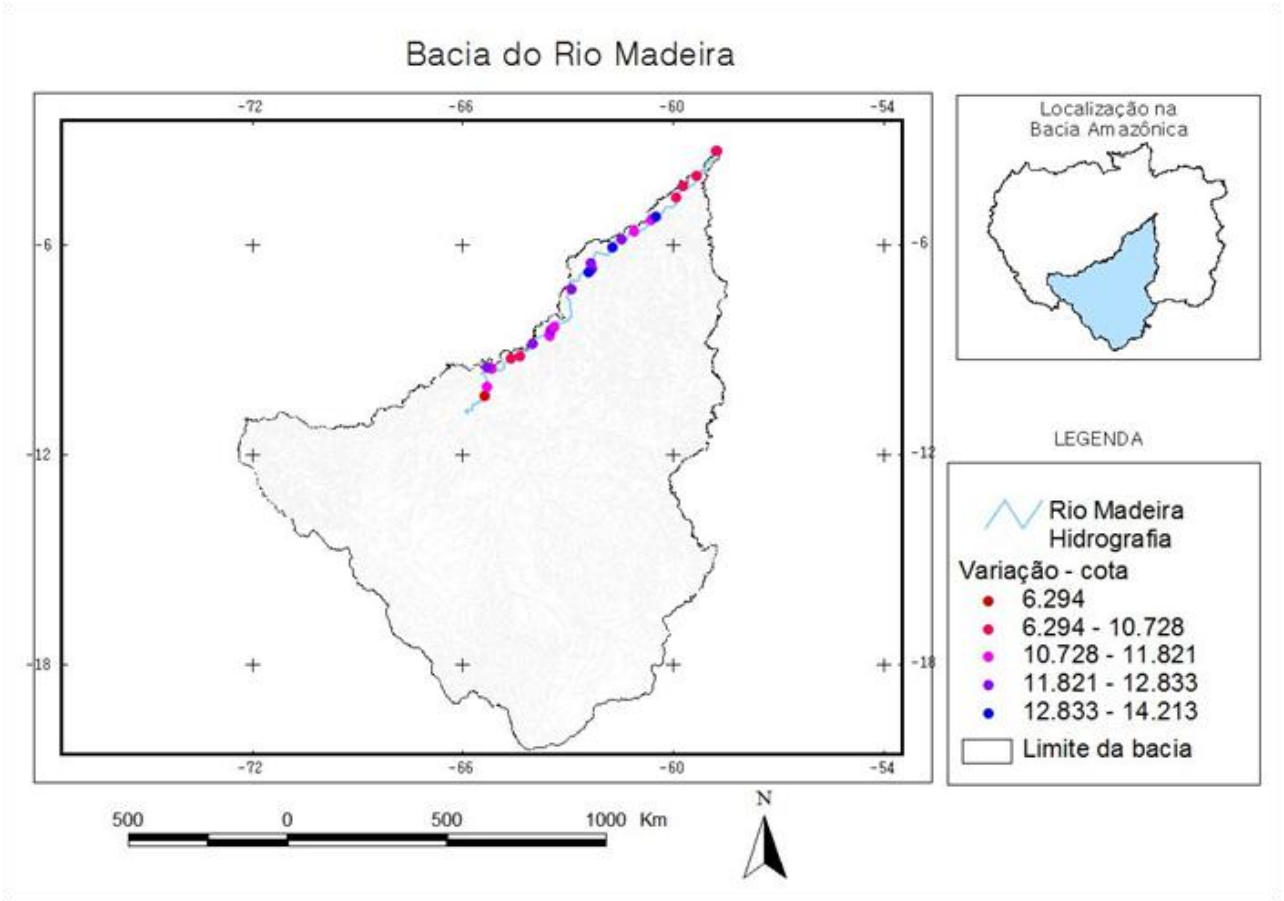


Figura 6 - Distribuição da amplitude média das estações virtuais com dados altimétricos do satélite ENVISAT no rio Madeira

Na Tabela 2 estão as 25 estações virtuais estudadas do rio Madeira com as médias das cotas altimétricas, o desvio padrão das cotas e o coeficiente de variação das cotas.

Nome da Estação	Media	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
MADEIRA_478_02	15,284	3,389	22,17
MADEIRA _063_01	15,346	3,425	22,32
MADEIRA _607	17,135	3,615	21,1
MADEIRA _020	18,848	3,597	19,08
MADEIRA _149	19,345	3,75	19,39
MADEIRA _693	22,185	4,619	20,82
MADEIRA _564	23,639	4,392	18,58

MADEIRA _235	25,669	4,279	16,67
MADEIRA _106	28,377	4,447	15,67
MADEIRA _779	30,058	4,958	16,49
MADEIRA _650_01	34,977	4,558	13,03
MADEIRA _321	35,255	4,425	12,55
MADEIRA _650_02	36,119	4,757	13,17
MADEIRA _865	40,005	4,496	11,24
MADEIRA _407	47,713	4,319	9,05
MADEIRA _192_01	48,188	4,416	9,16
MADEIRA _192_02	49,826	4,135	8,3
MADEIRA _192_03	49,9	4,204	8,43
MADEIRA _951	55,269	4,701	8,51
MADEIRA _736	66,539	3,527	5,3
MADEIRA _493	68,599	3,879	5,65
MADEIRA _278_01	85,538	4,364	5,1
MADEIRA _035	85,36	4,603	5,39
MADEIRA _278_02	90,37	4,241	4,69
MADEIRA _278_03	101,82	2,39	2,35

Tabela 2 - Estatísticas de média, desvio padrão e coeficiente de variação.

4. Conclusões

Os dados altimétricos de nível de água do satélite ENVISAT, utilizando o algoritmo *Ice-1,* permitiram a caracterização e análise da variabilidade espacial e sazonal do regime hidrológico do rio Madeira, Constituem, em princípio, a única fonte com potencial para alcançar a medição das extensas regiões transfronteiriças da bacia Amazônica, como o rio Madeira, onde foram criadas 25 estações altimétricas. Uma seleção especializada dos dados altimétricos utilizando a ferramenta VALS permitiu uma seleção tri-dimensional dos dados em um espaço superfície-profundidade, apresentando-se vantajosa, promovendo uma melhor seleção dos dados e reduzindo suas dispersões. Com 36 cm de RMS, a validação apresenta bons resultados, oferecendo a possibilidade de observação desta região como parte de um sistema de monitoramento integrado com os dados *in situ*. O regime hidrológico do rio demonstra ser multimodal, com dois períodos hidrológicos definidos ao longo do ano e ascensões e recessões assimétricas, de ascensão lenta e recessão rápida, como a estiagem ocorrendo, preferencialmente, durante os meses de setembro a novembro e a cheia estendendo-se durante os meses de fevereiro a junho. Os coeficientes de variação das cotas altimétricas denotam valores mais altos a jusante, decrescendo progressivamente à montante.

A missão altimétrica SWOT (*Surface Water Ocean Topography*), prevista para 2020, realizará uma cartografia completa das superfícies inundadas, bem como dos níveis de água, utilizando a tecnologia denominada altimetria interferométrica, contribuindo para responder a

questões científicas, ligadas, por exemplo, ao estudo de modificações climáticas e ao fluxo de contaminantes na água, no ar e em meios porosos, entre outros problemas. Ressalta-se que, com essa missão, os estudos relacionados com as variabilidades espaciais do regime hidrológico poderão ser efetuado com uma qualidade superior em resolução espacial e temporal pois serão fornecidas imagens bi-dimensionais com uma resolução espacial de 50-100m e o tempo de revisita do satélite, entre intertraços no Equador, esta previsto para 20 dias.

Agradecimentos

Ao *Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère – CTOH* do *Laboratoire d´Études en Geophysique et Océanographie Spatiales – LEGOS*, pelos *Geophysical Data Records – GDRs* e as correções troposféricas correspondentes e à *European Space Agency* – ESA pela garantia do uso dos dados da missão ENVISAT disponibilizados para a pesquisa. À Agência Nacional de Águas – ANA, pelos dados linimétricos. Ao *Global Rain Forest Mapping* – GRFM, pelas imagens do satélite JERS-1.

Referências Bibliográficas

BITTENCOURT, M. M. e AMADIO, S. A., 2007, Proposta para identificação rápida dos períodos hidrológicos em area de várzea do rio Solimões-Amazonas nas proximidades de Manaus, *Acta Amazônica*, v. 37, n. 2, pp. 303-308.

CHOW, V. T., 1964, *Handbook of applied hydrology*. New York: MacGraw-Hill Book Co.

CHRISTOFOLETTI, A., 1981, *Geomorfologia fluvial*. São Paulo: Edgard Blucher.

MONTGOMERY, D. G. e RUNGER, G. C., 2003, Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros 2 ed., Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. ISBN: 85-216-1360-1

PAVLIS, N. K. *et al*., 2008, Factor J.K. An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008. Em: *Proceedings of the 2008 General Assembly of the European Geosciences Union*, Vienna, Austria, 13-18/04/2008. Disponível em: http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08_wgs84.html

SILVA, J. S., 2010, *Altimetria Espacial em Zonas Úmidas da Bacia Amazônica - Aplicações Hidrologicas*. Saarbrücken (GE), Édition Universitaires Européennes. ISBN: 978-613-1-52979-5

SILVA, R. C. V., MASCARENHAS, F. C. B., MIGUEZ, M. G. 2003, *Hidráulica Fluvial.* v. 1, Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ. ISBN: 85-285-0059-4

TUCCI, C. E. M. (org), 2001, *Hidrologia: ciência e aplicação.* 2 ed., Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, ABRH.

VALS Tool, 2011, *Virtual ALtimetry Station*, Versão 1.0.3, 05/2011, COCHONNEAU, G. e CALMANT, S. Disponível em: http://www.mpl.ird.fr/hybam/outils/logiciels_test.php

VILLELA, S. M.; MATTOS, A., 1975, *Hidrologia aplicada*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil. ISBN: 75-0386